

폴리이미드막 표면에 직선 편광된 UV 광 조사에 의한 프리틸트각 발생과 전기광학특성

11-10-21

Pretilt Angle Generation and EO Performance in NLC with Polarized UV Light Irradiation on Polyimide Surface

서대식*, 이정호*, 이창훈*
(Dae-Shik Seo, Jeong-Ho Lee and Chang-Hoon Lee)

Abstract

We have investigated that the monodomain alignment of nematic liquid crystal (NLC) is obtained with polarized ultraviolet (PUV) light irradiation on polyimide (PI) surfaces. The LC alignment capability increases with increasing the UV light irradiation time. The polarized UV light irradiation of oblique angle of 60° irradiated on PI surface rotated by 90° at 10 min. after being normally irradiated on PI surface at 30 min., the generated pretilt angle of NLC is about 2.5° . The pretilt angle of NLC is attributed to the interaction between the LC molecules and the asymmetric triangular structure of polymer surface due to photo-depolymerization of polymer with the oblique UV light on PI surface. The voltage-transmittance and response time characteristics of photo-aligned twisted nematic (TN) - LCD with UV light irradiation time of 60 min. were almost same in comparison with the rubbing-treated TN-LCD.

Key Words(중요용어) : Nematic liquid crystal (네마틱 액정), Polyimide film (폴리이미드막), Photo-alignment (광배향), Pretilt angle (프리틸트각), EO performance (전기광학특성)

1. 서 론

액정배향처리 LCD 소자에 있어서 고체 기판 위에 액정분자를 균일하게 배열시키기 위한 필수적인 요소이다. 현재 전계효과를 이용한 구동방식의 LCD 소자의 액정배향처리는 개발 초기부터 러빙천 등을 이용하여 고분자 표면을 문지르는 러빙처리법이 사용되어 왔다.¹⁻⁵⁾ 그러나, 이 러빙 처리법은 기판과 기계적으로 접촉하는 방식으로서 러빙시 오물 및 정전기 등이 발생하여 TFT (thin-film-transistor) 소자를 파괴하는 등의 영향을 미치

고 있다.⁶⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해서 기계적인 러빙을 하지 않는 너러빙 처리법(rubbing-free treatment)이 강하게 요구되고 있다. 현재, 여러 종류의 너러빙 배향법 중에서도 광배향법이 큰 기대를 모으고 있다.

현재, 여러 가지 너러빙 처리법 중에서도 광분해법은 IBM의 Hasegawa 등이 제안한 것으로 폴리이미드 등의 고분자막에 직선편광된 자외선을 조사하여 특정한 방향을 향한 분자의 부분 결합을 선택적으로 절단하는 광분해 반응을 이용하여 광학 이방성을 발생시켜 액정분자를 배열시키는 방식이다.⁷⁾ 광중합법은 로슈의 M.Schadt 등이 개발한 것으로 광중합 반응을 나타내는 고분자막에 직선 편광을 조사하여 어떤 특정 방향을 향한 분자만을 중합 반응시켜 광학 이방성을 발생시켜 액정분자를 배열시키는 방법이다.⁸⁾ 광이성화법은 W.M.Gibbons 등이 제안한 것으로 반응을 나타내는 분자를 고분자에 혼합하여 폴리이미드막을 만들어 편광된 광을 조사시켜 액정분자

* : 숭실대학교 공대 전기공학과
(서울시 동작구 상도 5동 1-1, Fax: 02-826-6924
E-mail : dsseo@elecprw.soongsil.ac.kr)
1998년 7월 23일 접수, 1998년 9월 7일 심사완료
<'98 춘계학술회의에서 우수논문으로 추천됨>

의 방향을 제어하는 기술이다.⁹⁾

최근, 폴리이미드막에 UV 광을 조사한 액정배향 및 프리틸트각 발생에 관하여 여러 연구자 등에 의하여 보고되었다.¹⁰⁻¹⁵⁾ 최근, Wang 등은 측쇄기를 가진 (SE-610) 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 1차 조사 한 후 기판을 90° 로 돌려 직선편광된 UV 광을 조사시키는 광 조사법을 이용하여 5° 정도의 프리틸트각을 실현하였다.¹¹⁾ 그리고, 본 저자 등은 폴리이미드 표면에 UV 광을 경사 조사시의 액정배향 및 프리틸트각의 발생에 관하여 보고하였다.¹⁶⁾ 본 연구에서는 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 조사한 셀에서의 네마틱 액정의 프리틸트각 발생과 광배향 TN-LCD의 전기광학특성 등에 관하여 연구하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 고분자의 분자구조를 그림 1에 나타내었다 (Nissan Chemical Industries Co., Ltd. 제공).

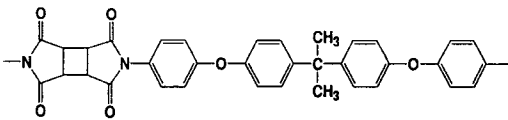
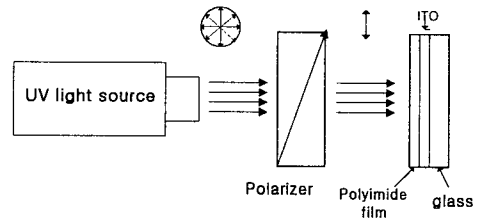


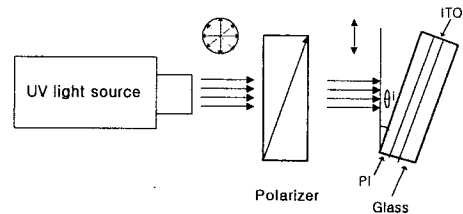
그림 1. 사용한 고분자의 분자구조.
Fig. 1. The used polymer molecular structure.

그림 1에 나타난 프리커서는 ITO (indium-tin-oxide) 전극이 코팅된 유리 기판 위에 스펀 코팅법을 이용하여 균일하게 도포한 후 핫 플레이트에서 80°C에서 10분간 열처리를 한 후에 오븐에서 250°C에서 1시간 동안 열처리하여 폴리이미드막을 형성하였다. 폴리이미드막에 직선 편광된 UV 광을 조사하는 방법을 그림 2에 나타내었다. 광원은 1 kW 용량의 UV 램프를 사용하였으며 UV의 파장 영역이 365nm에서 가장 높은 흡수치를 가진다. UV 광 조사는 프리틸트각을 발생시키기 위하여 기판 표면에 직선 편광된 UV 광을 수직으로 조사한 경우와 직선 편광된 UV 광을 수직으로 30분간 1차 조사한 후, 다시 이 기판을 면내방향으로 90° 로 회전한 후 10° ~80° 의 경사각으로 2차 조사시킨 경우를 사용하였다. 그리고 광배향셀의 특성을 비교하기 위하여 러빙 처리한 셀을 제작하였다. 러빙처리에 사용한 러빙강도 RS (rubbing strength) 는 이전의 논문에서 보고하였다.^{3,4)} 그리고 셀은 약 60μm의 두께로 하여 anti-parallel 구조로 제작하였다. 또한 직선 편광된 UV 광을 수직으로 조사한 광배향 TN-LCD와

러빙 처리한 TN-LCD를 5μm의 두께로 제작하였다. 사용한 액정은 불소계열의 네마틱 액정 (fluorinated type mixture; T_c=87°)으로 진공 상태에서 nematic phase 및 isotropic phase로 각각 주입하였으며, 97°C에서 30분간 열처리한 후 서냉하였다. 프리틸트각은 실온에서 결정화 전법을 이용하여 측정하였다. 광배향을 이용한 TN-LCD의 전기광학특성의 평가에는 전압-투과율(V-T) 특성 및 응답특성을 측정하였다.



(a) normal irradiation (first).



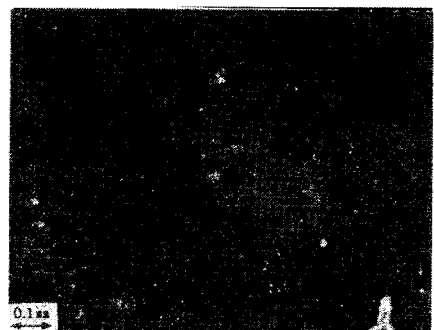
(b) oblique irradiation (second).

그림 2. UV 광의 조사장치.

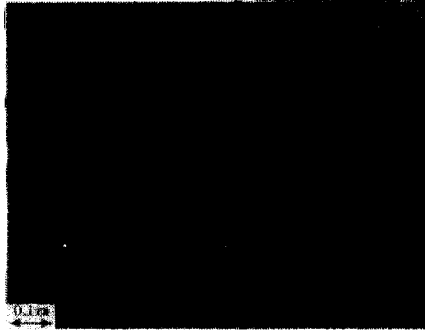
Fig. 2. The system of used UV light irradiation.

3. 결과 및 고찰

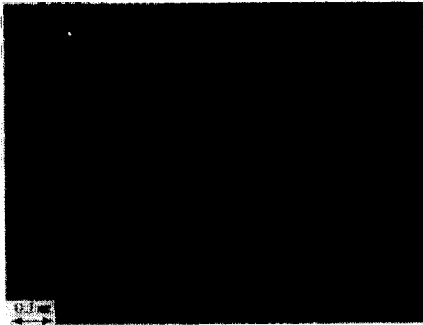
그림 3은 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 수직으로 조사시킨 셀의 네마틱 액정의 편광 현미경 사진을 나타낸다.



(a) irradiation time of 10min.



(b) irradiation time of 30min.



(c) irradiation time of 60min.

그림 3. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 조사 시의 네마틱 액정의 편광현미경사진(직교상태).

Fig. 3. The microphotographs of aligned NLC in cells with PUV light irradiation on PI surface (under crossed Nicols).

그림 3에 나타난 바와 같이 UV 광의 조사시간이 증가할수록 디스클리네이션이 없는 균일한 배향상태가 얻어지는 것을 알 수 있다. 러빙 처리한 액정셀에서는 러빙방향으로 고분자가 연신되어 재배열된 고분자의 방향으로 액정분자가 배열되지만, 직선 편광된 UV 광을 조사한 액정셀에서는 UV 광의 조사방향의 직교방향으로 액정분자가 배열된다. 이것은 편광된 UV 광의 조사에 의하여 고분자의 알킬기 등이 광분해되고 그 부분과 직교방향으로 액정분자가 배열하는 것으로 생각할 수 있다. 즉, 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광의 조사에 따른 광분해 반응으로 인하여 액정분자가 배열되는 것으로 생각할 수 있다.

그림 4에 폴리이미드막 표면에서의 네마틱 액정의 프

리틸트각의 러빙강도 의존성을 나타내었다. 러빙강도가 중간정도인 RS=262mm까지는 프리틸트각이 0.5° 정도이고, 그 이상에서는 약 1.5° 정도의 프리틸트각이 발생하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 러빙강도 RS가 작을 때는 폴리머의 배향성이 떨어지며, 러빙강도가 증가하면 배향성이 증가하여 프리틸트각이 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

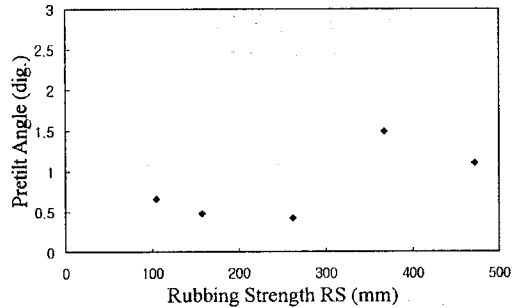


그림 4. 측쇄기를 갖는 폴리이미드 표면에서의 러빙강도에 따른 프리틸트각의 발생.

Fig. 4. The generation of pretilt angle in NLC on PI surface with side chain as a function of rubbing strength.

그림 5에 폴리이미드표면에 직선 편광된 UV 광을 수직으로 조사시킨 셀에서의 UV 광의 조사시간에 대한 프리틸트각 의존성을 나타내었다. UV 광의 조사시간이 5~60분의 영역에서 프리틸트각이 1° 미만을 나타내고 있다. 이것은 직선 편광된 UV 광을 폴리이미드 표면에 수직으로 조사시키기 때문에 액정분자에 한쪽으로 방향성을 주는 것이 감소하기 때문에 프리틸트각이 작게 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

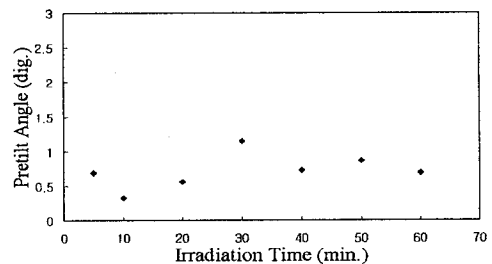


그림 5. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 조사 시의 UV 광의 조사시간에 따른 프리틸트각 발생.

Fig. 5. The generation of pretilt angle in NLC on PI surface as a function of PUV light irradiation time.

폴리이미드막 표면에 직선 편광된 UV 광을 30분간 1차 조사하고 기판을 90° 회전시켜 2차로 UV 광 조사시의 네마틱 액정의 배향을 편광현미경으로 관찰한 결과 균일한 배향이 얻어짐을 알 수 있었다. 즉, UV 광의 1차 조사는 고분자의 광분해 반응으로 인해 직교방향으로 광학이방성을 주고 그 방향으로 액정분자가 배열하며, 2차 조사는 배향방향에는 기여하지 않는 것으로 생각할 수 있다. 그리고 직선 편광된 UV 광을 폴리이미드 표면에 30분간 1차 조사한 후 기판을 90° 회전시켜 UV 광을 2차로 경사조사시의 프리틸트각의 경사각 의존성을 그림 6에 나타내었다.

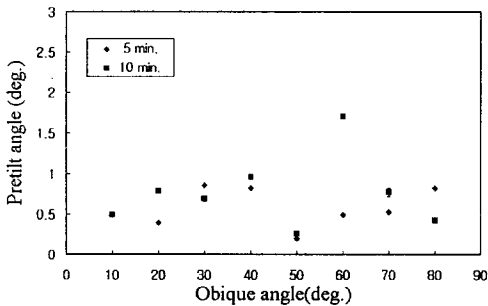


그림 6. 폴리이미드막 표면에 직선 편광된 UV 광을 30분간 1차 조사한 후, 기판을 90° 회전시켜 2차로 경사 조사 조사시의 프리틸트각의 경사각 의존성.

Fig. 6. The oblique angle dependence of pretilt angle in NLC in cells with oblique polarized UV light is irradiated on PI surfaces rotated by 90° after it is normally irradiated on PI surface for 30 min.

2차 조사시 UV 광의 조사시간이 10분인 경우 경사각이 증가할수록 프리틸트가 증가하며, 60°의 경사각에서 약 1.8°가 얻어졌으며, 그 이상의 경사각에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 UV 광의 2차 조사시 경사각이 작으면 UV 광의 에너지가 많이 입사되어 폴리머의 광분해가 많이 발생되고 비대칭 삼각구조를 만들기 어려워 프리틸트가 작게 발생한다. 그리고, 경사각이 60°에서는 에너지가 감소되어 광분해 반응이 다소 감소되며 존재하는 고분자에 의해 비대칭 삼각구조가 비교적 많이 형성되어 프리틸트각이 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 그리고 경사각이 70° 이상에서는 에너지가 더욱 감소되어 광분해가 적게 발생되며 비대칭 삼각구조가 형성되기 어려우며 프리틸트각이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 즉, UV 광의 2차 조사에 의한 고분자의 부분절단에 의해 비대칭 삼각구조가 발생되어 액정분자와의 상호

작용에 의하여 프리틸트각이 발생한다고 생각할 수 있다. 이러한 광분해법을 이용한 액정셀에서의 프리틸트각은 그림 4에 나타낸 바와 같이 러빙 처리한 셀에서의 크기와 거의 같은 정도를 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

그림 7에 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 1차로 30분간 조사한 후 기판을 90° 회전시켜 2차로 UV 광을 60° 경사조사시의 프리틸트각의 조사시간 의존성을 나타내었다. 프리틸트각은 UV 광의 2차 조사시간이 10분까지는 증가하는 경향을 나타내며 20분 이상의 시간에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 일정한 경사각에서의 UV 광의 2차 조사시 고분자의 절단의 정도에 따라서 프리틸트각이 변화하고 있는 것을 나타내고 있다. 즉, 직선 편광된 UV 광을 폴리이미드 표면에 조사한 경우 2차 조사는 프리틸트의 발생에 크게 기여하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 결과는 Wang 등이 발표한 결과와 잘 일치하고 있다.¹¹⁾ 이러한 결과로부터 폴리이미드 표면에 UV 광을 2차 조사하는 방법을 이용한 프리틸트각의 발생은 비교적 안정하다고 생각할 수 있다.

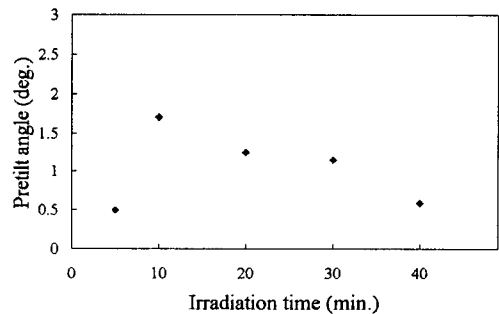


그림 7. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 30분간 1차 조사한 후, 기판을 90° 회전시켜 UV 광을 60° 경사로 조사한 셀에서의 조사시간에 따른 프리틸트각 발생.

Fig. 7. The irradiation time dependence of pretilt angle in the cell whe polarized UV light oblique angle of 60° is irradiated on PI surface rotated by 90° after it is normally irradiated on PI surface for 30min.

그림 8에 직선 편광된 UV 광을 폴리이미드 표면에 30분간 1차 조사하고 기판을 90° 회전시켜 UV 광을 5분간 경사조사(2차)시의 nematic phase 과 isotropic phase로 각각 액정을 주입한 경우의 프리틸트각 발생을 나타내었다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 isotropic phase에서 주입한 경우 경사각이 50°까지는 작은 프리틸트를 나타내었다. 그리고 경사각 60°에서 약 2.5°의 큰 값을 나타내었다.

그 이상의 경사각에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 그림 6의 경사 UV 광의 10분 조사에 대한 결과와 같은 경향을 나타냄을 알 수 있다.

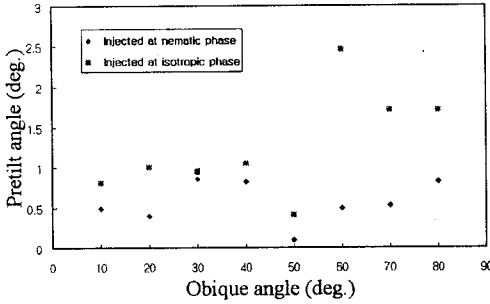


그림 8. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 30분간 1차 조사한 후, 기판을 90° 회전시켜 UV 광을 2차로 5분간 경사 조사한 셀에서의 경사각 의존성. ◆ nematic phase 주입, ■ isotropic phase 주입.

Fig. 8. The oblique angle dependence of pretilt angle for NLC in cells with oblique polarized UV light is irradiated on PI surface rotated by 90° at 5 min. after it is normally irradiated on PI surface for 30 min.. ◆ injected at nematic phase, ■ injected at isotropic phase.

그림 9에 고분자막에 직선 편광된 UV 광을 수직으로 조사한 광배향 TN-LCD의 조사시간에 따른 on, off 시의 편광현미경 사진을 나타내었다. UV 광의 조사시간이 증가할수록 콘트라스트비가 증가하는 것을 알 수 있다.

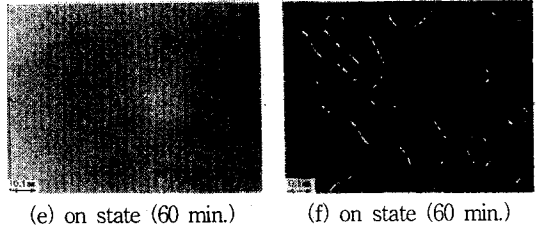
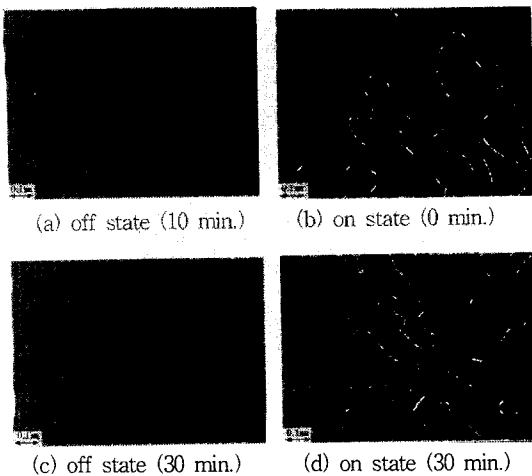


그림 9. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 조사한 광배향 TN-LCD의 편광현미경사진 (직교 상태).
Fig. 9. The microphotographs of photo-aligned TN-LCD with PUV light irradiation on PI surface (under crossed Nicols)

그림 10과 표 1에 직선 편광된 UV 광의 조사시간에 따른 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD와의 V-T 특성을 나타내었다. 그림 10에 나타낸 바와 같이 UV 광의 조사시간이 증가할수록 V-T 특성이 향상되며, 60분 조사한 광배향 TN-LCD는 러빙 처리한 TN-LCD의 특성과 거의 동등함을 알 수 있다.

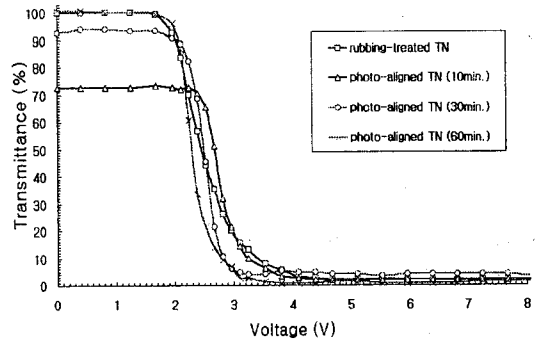


그림 10. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 조사한 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD에서의 V-T 특성.

Fig. 10. The voltage-transmittance characteristics of photo-aligned TN-LCD with PUV light irradiation on PI surface and rubbing-treated TN-LCD.

폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광의 조사시간에 따른 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD와의 응답 특성을 그림 11과 표 2에 나타낸다. 그림 11에 나타낸 바와 같이 UV 광의 조사시간이 증가할수록 응답특성이 향상되는 경향을 나타내고 있다. 그리고 직선 편광된 UV

광을 10분 및 30분간 조사시킨 광배향 TN-LCD의 응답 특성에서 backflow 효과에 의한 bounce가 나타남을 알 수 있었다. 이 현상은 UV 광의 조사시간이 작을 경우 액정의 배향성이 감소되어 액정분자의 비틀림 상태가 불안정하기 때문에 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 그렇지만 60분 조사에 대한 광배향 TN-LCD는 약 48.9ms로 러빙 처리한 TN-LCD와 응답특성이 거의 유사한 경향을 나타내었다.

표 1. 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD의 인가전압에 따른 투과율.

Table 1. The applied voltage versus transmission for photo-aligned TN-LCD and rubbing-treated TN-LCD on PI surface

TN Voltage	photo-aligned TN-LCD (10 min.)	photo-aligned TN-LCD (30 min.)	photo-aligned TN-LCD (60 min.)	rubbing-treated TN-LCD
V_{90}	×	2.02	2.07	1.99
V_{10}	3.28	2.82	2.76	3.39

※ V_{90} 은 투과율이 90%일 때의 전압, V_{10} 은 투과율이 10%일 때의 전압

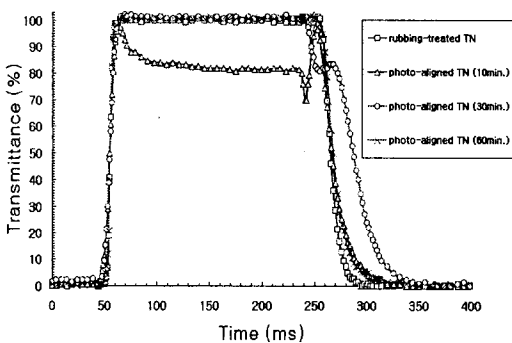


그림 11. 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 조사한 광배향 TN-LCD와 러빙처리한 TN-LCD의 응답 특성.

Fig. 11. The response time characteristics of photo-aligned TN-LCD with PUV light irradiation on PI surface and rubbing-treated TN-LCD.

표 2. 광배향 TN-LCD와 러빙 처리한 TN-LCD의 응답 특성.

Table 2. The response time for photo-aligned TN-LCD and rubbing-treated TN-LCD on PI surface

Time	photo-aligned TN-LCD (30 min.)	photo-aligned TN-LCD (60 min.)	rubbing-treated TN-LCD
Rising Time τ_r (ms)	11.4	10.1	8.4
Decay Time τ_d (ms)	73.6	38.8	26.0
Response Time τ (ms)	85.0	48.9	34.4

4. 결 론

본 연구에서는 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광 조사시의 프리틸트각의 발생 및 전기광학특성에 관하여 검토하였다. 폴리이미드 표면에 UV 광을 수직으로 조사시의 프리틸트각은 UV 광의 조사시간이 증가하여도 일정한 경향을 나타내었다. 또한, 폴리이미드 표면에 UV 광을 1차로 30분간 조사시킨 후 기판을 90° 회전 한 후 2차로 UV 광을 경사 조사시킨 경우 2차 UV 광의 경사각이 증가함과 함께 프리틸트각이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 UV 광의 조사각도에 따라서 입사되는 UV 광의 에너지가 차이에 따라서 비대칭 삼각구조가 발생하여 프리틸트각이 변화하는 것으로 생각할 수 있다. 그리고 UV 광을 60°로 2차 조사시킨 경우 프리틸트각은 조사시간이 10분까지는 증가하였으나, 그 이상에서는 감소하는 경향을 알 수 있었다. 그리고, 폴리이미드 표면에 직선 편광된 UV 광을 수직으로 조사한 광배향 TN-LCD의 전기광학특성은 UV 광의 조사시간이 증가할수록 V-T 특성과 응답특성이 더욱 향상됨을 알 수 있었으며, 특히 60분 조사한 광배향된 TN-LCD는 러빙 처리한 TN-LCD의 특성과 거의 동등한 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 국가선도 기술개발사업(차세대 평판표시장치기술 개발사업)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다

참 고 문 헌

1. J. Cognard, "Alignment of nematic liquid crystals and their mixtures", *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Supplement*, 1, 1982.
2. T. Sugiyama, S. Kuniyasu, D.-S. Seo, H. Fukuro, and S. Kobayashi, "A simple model for pretilted nematic liquid crystal medium and its torsional surface coupling strength", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 29, 2045, 1990.
3. D.-S. Seo, K. Muroi, and S. Kobayashi, "Generation of pretilt angles in nematic liquid crystal, 5CB, media aligned on polyimide films prepared by spin-coating and LB techniques : effect of Rubbing", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 213, 223, 1992.
4. D.-S. Seo, S. Kobayashi, and M. Nishikawa, "Study of the pretilt angle for 5CB on rubbed polyimide films containing trifluoromethyl moiety and analysis of the surface atomic concentration of F/C(%) with an electron spectroscope for chemical analysis", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, 2392, 1992.
5. D.-S. Seo, N. Yoshida, S. Kobayashi, M. Nishikawa, and Y. Yabe, "Effect of the molecular structure of weakly rubbed organic solvent soluble polyimide with trifluoromethyl moieties on anchoring strength of liquid crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 34, 4896, 1995.
6. H. Matsuda, D.-S. Seo, N. Yoshida, K. Fujibayashi, and S. Kobayashi, "Estimation of the static electricity and optical retardation produced by the rubbing polyimide and polyamide films with different fabrics", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 264, 23, 1995.
7. M. Hasegawa, H. Takano, Y. Momi, and K. Nakayama, "Relationships between the image-sticking time and electrical characteristics of UV-exposed two-domain wide-viewing-angle LCD", *SID digest paper.*, 666, 1996.
8. M. Schadt, K. Schmitt, V. Kozinkov, and V. Chigrinov, "Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photo polymers", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, 2155, 1992.
9. W. M. Gibbons, P. J. Shannon, S.-T. Sun, and B. J. Swelin, "Surface-mediated alignment of nematic liquid crystals with polarized laser light", *Nature*, Vol. 351, 49 (1991).
10. J. L. West, X. Wang, and Y. Ji, J.R. Kelly, "Polarized UV-exposed polyimide films for liquid-crystal alignment, *SID digest paper*", 703, 1995.
11. X. Wang, D. Subacius, O. Lavrentovich, and J.L. West, "Four-domain LCD using high-pretit photoaligned polyimide substrates", *SID digest paper*, 654, 1996.
12. K.-W. Lee, A. Lien, and J. Stathis, "Mechanism of UV modification of LC pretit angle and its application to two-domain TN-LCDs" *SID digest paper*, 638, 1996.
13. T. Yamamoto, M. Hasegawa, and H. Hatoh, "Liquid-crystal alignment by slantwise irradiation of non-polarized UV light on a polyimide layer" *SID digest paper*, 642, 1996.
14. X. Wang and J.L. West, "The mechanism of pretit generation on polarized ultraviolet light aligned polyimide film", *SID digest paper*, 5, 1997.
15. Y. Iimura and S. Kobayashi, "Prospects of the photo-alignment technique for LCD fabrication", *SID digest paper*, 311, 1997.
16. D.-S. Seo, L.-Y. Hwang, and S. Kobayashi, "Investigation of pretit angle generation in nematic liquid crystal with slanted non-polarized ultraviolet light irradiation on polyimide surfaces", *Liquid Crystals*, Vol. 23, 923, 1997.